

## Laboratorio: Experiencia de Inclinación

### Resumen

El laboratorio de la asignatura Teoría del Buque se realiza con el objetivo de que el alumno tenga una primera aproximación al procedimiento que supone la experiencia de inclinación, obteniendo mediante datos experimentales la posición vertical del centro de gravedad del buque vacío.

### Introducción

El experimento de inclinación es una herramienta fundamental en la determinación de las condiciones de estabilidad de un buque, permitiendo determinar con relativa exactitud la posición vertical de su centro de gravedad en la condición de buque vacío.

En etapas iniciales, la determinación de la posición del centro de gravedad del buque vacío se realiza en forma aproximada a través de la ubicación referenciada de los distintos pesos, ítems, que constituyen el buque. Sin embargo para muchos de estos ítems, por su forma en el espacio, como las chapas que conforman el casco o la soldadura que las unen, el centro de gravedad sólo puede ser obtenido a partir de modelos o aproximaciones con menores niveles de certeza. Al tratarse, estos ítems, de los elementos que más aportan a la posición del centro de gravedad del conjunto, se hace necesario verificar de alguna manera esas hipótesis, para lo cual se ha adoptado una metodología que utiliza los fundamentos de la hidrostática aplicada a flotadores, y que ha sido denominada Experiencia de Inclinación.

La experiencia o experimento de inclinación es aplicada en primera instancia a buques recién construidos, y luego en etapas sucesivas en su vida útil para confirmar el mantenimiento o variación de la posición del centro de gravedad.

Cabe aclarar que, la condición de buque vacío, en general, se interpreta como aquella en la que el buque posee todos sus sistemas instalados pero sin contar la tripulación y sus efectos, provisiones, carga y elementos consumibles a excepción de los fluidos propios de la maquinaria y los que se encuentran en las tuberías en las cantidades mínimas de nivel de servicio.

El presente laboratorio reproduce a escala las características de un experimento real, permitiendo al estudiante familiarizarse con los procedimientos involucrados y la determinación de la posición vertical del centro de gravedad mediante métodos analíticos utilizando los datos resultantes obtenidos durante la prueba.

### Fundamentación

#### Teorema de traslación de pesos

Si en un conjunto de pesos uno de ellos se mueve, el centro de gravedad del conjunto se moverá en forma paralela y en el mismo sentido una distancia que puede ser calculada como:

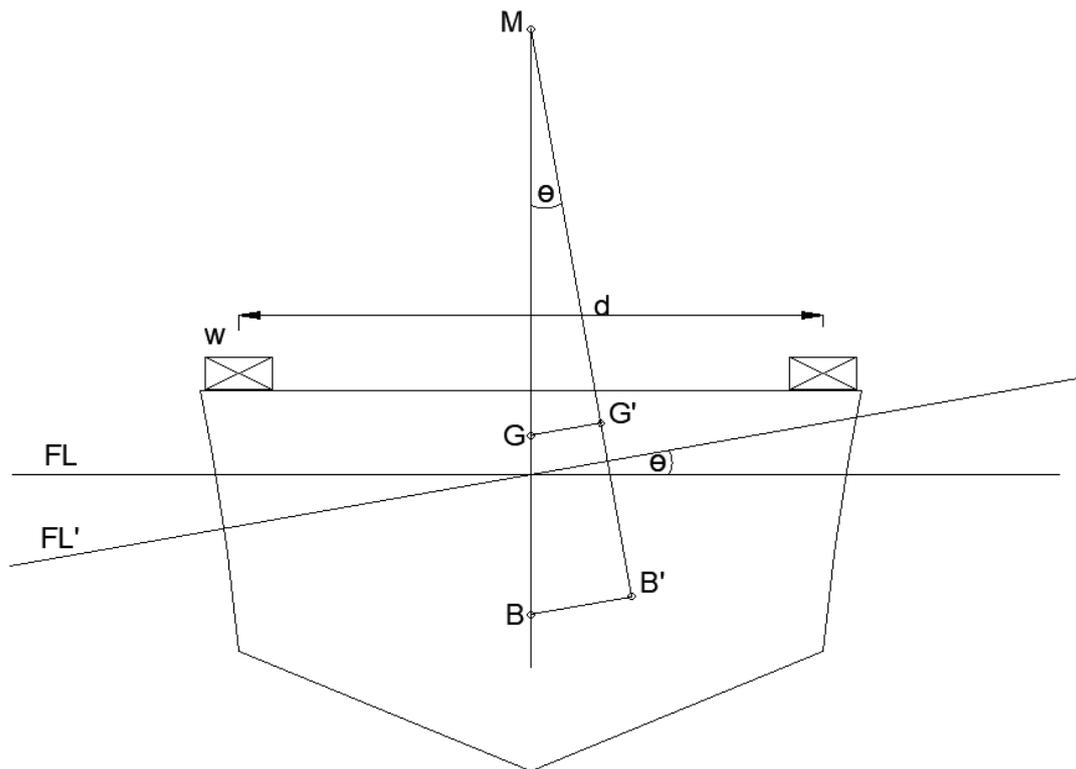
$$GG' = \frac{d \times w_j}{W} \quad [1]$$

Donde  $GG'$  es la distancia que se desplaza el centro de gravedad del sistema,  $d$  es la distancia que se mueve el peso  $w_j$ , y  $W$  es el peso del sistema.

**Movimientos transversales de pesos**

Los movimientos de pesos a bordo modifican la distribución inicial y determinan el movimiento del centro de gravedad a una nueva posición, punto desarrollado anteriormente.

Se tiene un buque con un desplazamiento  $\Delta$ , un centro de gravedad  $G$ , un centro de carena  $B$ , y cuenta con un peso  $w$  ubicado en cubierta sobre una de las bandas. En esta condición inicial el buque se encuentra adrizado con una flotación  $FL$ . El peso  $w$  se desplazada de una banda a la otra, una distancia  $d$ , generando un desplazamiento del centro de gravedad del buque y por tanto una nueva flotación girada  $FL'$ . Como se muestra en la Figura 1.



*Figura 1. Movimiento transversal de un peso w.*

El centro de gravedad se mueve de  $G$  a  $G'$  generándose un par que forzará la escora de la embarcación hacia la banda que se haya trasladado el peso  $w$ . Este par o momento de escora hará que la carena gire hasta que el nuevo centro de carena  $B'$  se ubique de nuevo en la vertical que pasa por el centro de gravedad, alineando el peso y el empuje en la misma vertical, y por lo tanto encontrándose el buque en una nueva posición de equilibrio estático, ahora naturalmente escorado.

En esta nueva posición de equilibrio el plano de crujía quedará formado un ángulo  $\theta$  con la normal al nuevo plano de flotación, siendo éste el ángulo de escora. Analizando la Figura 1 se deduce la siguiente relación trigonométrica:

$$\tan \theta = \frac{GG'}{GM} \tag{2}$$

Donde  $GM$  es la altura metacéntrica y  $GG'$  es la variación del centro de gravedad.

Por el teorema de traslación de pesos se sabe que

$$GG' = \frac{d \times w}{\Delta} \quad [3]$$

Sustituyendo [3] en [2] se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tan \theta = \frac{d \times w}{GM \times \Delta} \quad [4]$$

Con esta última formulación es posible calcular la escora producida por el movimiento horizontal del peso  $w$ .

Movimiento de cargas líquidas

Cuando los tanques están parcialmente llenos de cargas líquidas, la superficie de estos líquidos se mantiene paralela a la línea de flotación del buque. Al producirse una pequeña escora, Figura 2, parte del volumen líquido (cuñas) se desplaza en sentido transversal, en un movimiento que puede ser analizado como una traslación de pesos. Esta traslación de pesos resultará por tanto en una traslación del centro de gravedad del buque.

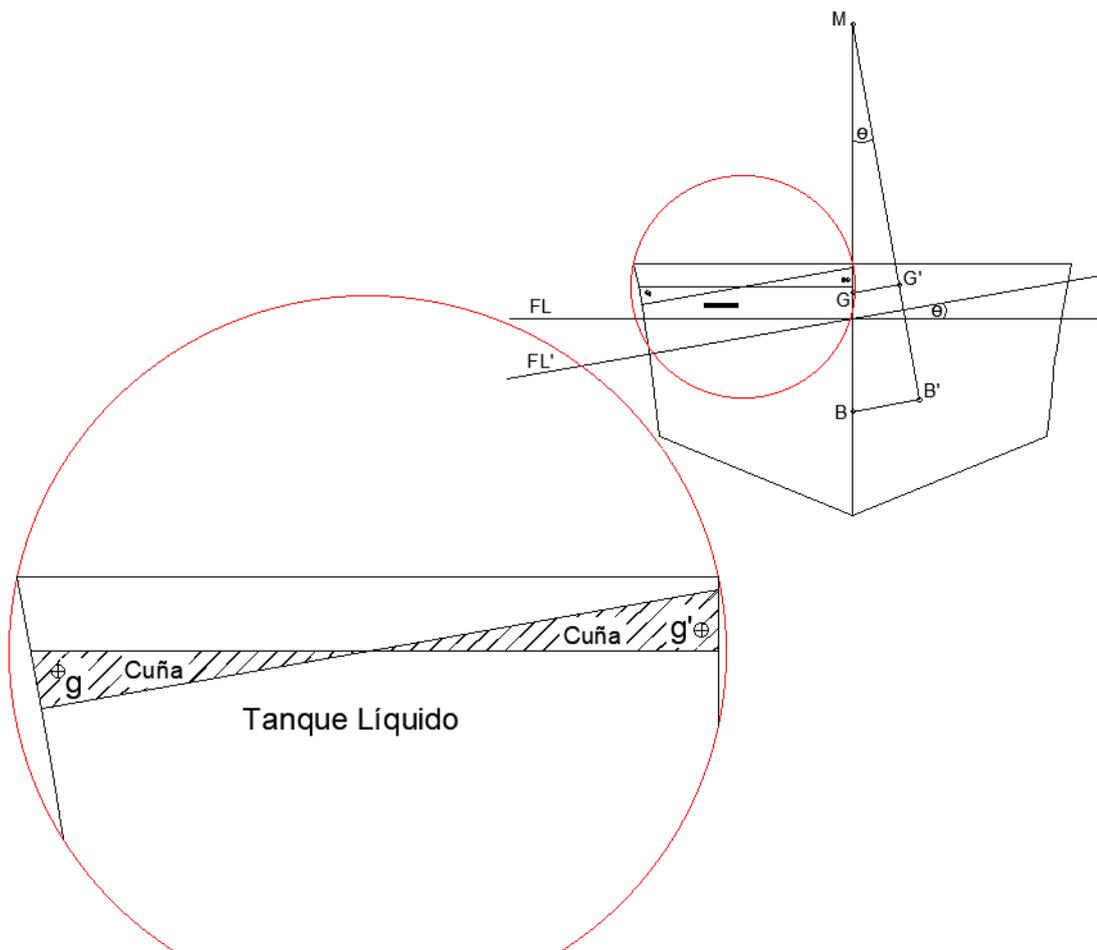


Figura 2. Superficie libre.

El efecto de ese momento de escora es interpretado como una elevación virtual del centro de gravedad del buque, cuya magnitud está representada por la siguiente expresión:

$$GG_V = \frac{i_L}{\nabla} \times \frac{\rho_L}{\rho_A} \quad [5]$$

Siendo:

- $i_L$  : Inercia de la superficie líquida
- $\nabla$  : Volumen de carena
- $\rho_L$  : Densidad del líquido dentro del tanque
- $\rho_A$  : Densidad del agua

### Experimento de Inclinación

La Experiencia de Inclinación, basada en los fundamentos de traslación transversal de pesos abordo, se realiza con el cometido de determinar con la mayor precisión posible la posición el centro de gravedad del buque vacío, que servirá de base para todos los cálculos posteriores de las condiciones de estabilidad y trimado, de los distintos estados en servicio y en carga del buque de los Libros de Carga o Cuadernos de Estabilidad.

El procedimiento consiste en el movimiento transversal de pesos conocidos ubicados sobre la cubierta, y el registro de la escora producida por dichos movimientos, Figura 3.

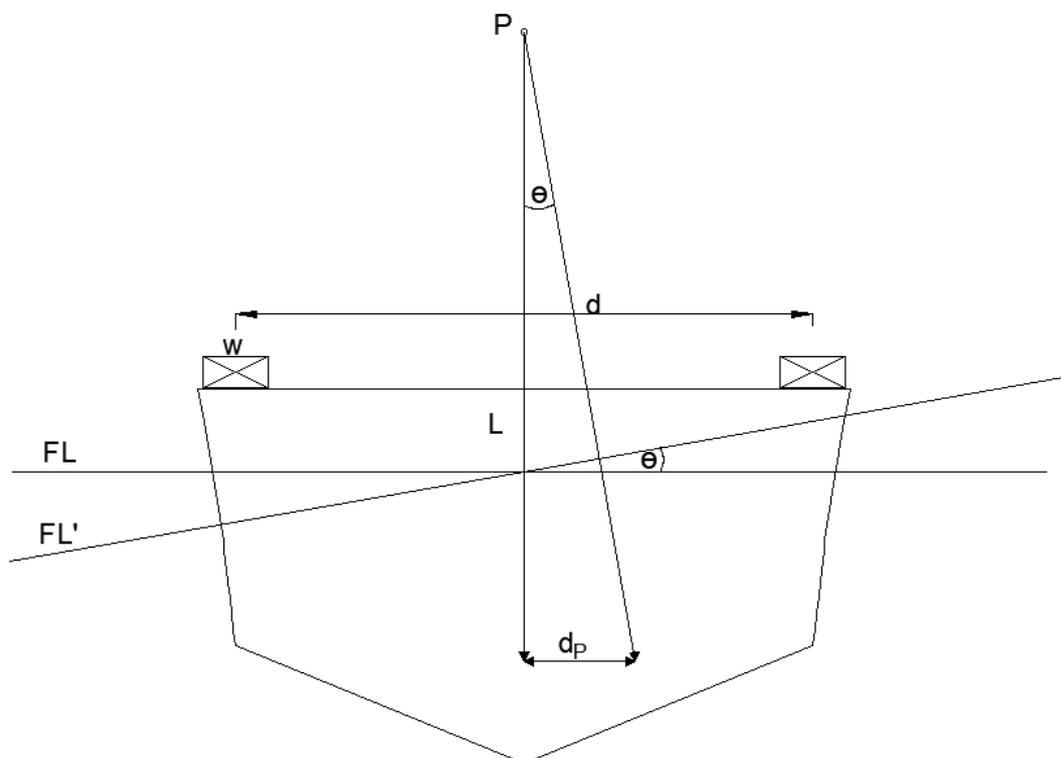


Figura 3. Experimento de Inclinación.

Para registrar el movimiento angular se utiliza un péndulo de largo  $L$ , cuya parte inferior al moverse recorre una cierta distancia  $d_p$ ; la relación entre ambas magnitudes define el arco registrado, como muestra la siguiente ecuación:

$$\tan \theta = \frac{\text{Desviación del Péndulo}}{\text{Longitud del Péndulo}} = \frac{d_p}{L} \quad [6]$$

Por otro lado, al mover un peso de una banda a la otra, la escora producida será:

$$\tan \theta = \frac{d \times w}{GM \times \Delta} \quad [7]$$

Igualando las ecuaciones [6] y [7] y despejando la altura metacéntrica, se llega a la siguiente relación

$$GM = \frac{d \times w \times L}{\Delta \times d_p} \quad [8]$$

Sabiendo que la posición vertical del metacentro transversal,  $KM_T$ , es la suma de la posición vertical del centro de gravedad,  $VCG$ , más la altura metacéntrica  $GM$ , es decir  $KM_T = VCG + GM$ . Entonces, la posición vertical del centro de gravedad puede calcularse como:

$$VCG = KM_T - GM \quad [9]$$

Sustituyendo [8] en [9]:

$$VCG = KM_T - \frac{d \times w \times L}{\Delta \times d_p} \quad [10]$$

En el caso de que el buque cuente con cargas líquidas es necesario considerar su efecto sobre el centro de gravedad. Teniendo esto en cuenta, en el caso de contar con superficie libres de cargas líquidas, la ecuación [10] queda:

$$VCG = KM_T - \frac{d \times w \times L}{\Delta \times d_p} - \frac{i_L}{\nabla} \times \frac{\rho_L}{\rho_A} \quad [11]$$

## Práctica – Experimento de Inclinación

### Objetivo

Calcular la posición del centro de gravedad del buque vacío (*VCG* y *LCG*) y el desplazamiento del mismo en esta condición.

### Características generales

La práctica consiste en realizar el Experimento de Inclinación a escala en condiciones de laboratorio de un modelo en un tanque de acrílico de dimensiones  $1,47m \times 0,50m \times 0,25m$ .

El modelo a ensayar posee las siguientes dimensiones:

$$L = 1,000 \text{ m}$$

$$B = 0,295 \text{ m}$$

$$D = 0,186 \text{ m}$$

En el anexo se encuentran las curvas hidrostáticas que deberán ser utilizadas para realizar los cálculos correspondientes.

### Procedimiento

#### SIN CARGAS LÍQUIDAS

Para comenzar se deben pesar los pesos, el inclinómetro y el soporte e identificar los pesos. Montar el soporte y sobre él montar el inclinómetro y los pesos de manera tal de respetar lo indicado en la tabla de movimiento de pesos (tabla ubicada en el anexo). Luego deberá registrarse la posición de los centros de gravedad de los pesos, inclinómetro y soporte.

Con todo ya ubicado, se comienza con la secuencia de pesos dada por la tabla antes mencionada. Por cada movimiento se deberá registrar distancia de traslación del peso y el ángulo de escora, esperando que el casco se estabilice y alcance su posición de equilibrio entre movimiento y movimiento.

Se sigue el mismo procedimiento hasta completar toda la secuencia de movimientos, debiendo quedar los pesos al final del último movimiento en la posición inicial. Luego se debe medir la densidad del agua y determinar los calados de proa y de popa.

#### CON CARGAS LÍQUIDAS

Repetir el procedimiento anterior con la diferencia de que antes de realizar la secuencia de movimientos deberá registrar el volumen de agua añadido al tanque y la posición de su centro de gravedad.

### Informe

Se deberá realizar un informe con el lenguaje, formulaciones y formato general consistente con el de un informe técnico debiendo incluir:

1. Marco teórico.
2. Detalle completo de las consideraciones que deben realizarse para llevar a cabo el Experimento de Inclinación en condiciones reales.
3. Descripción resumida de operaciones y registros realizados durante el laboratorio.

4. Desarrollo de cálculos realizados.
5. Presentar como conclusiones el desplazamiento y el centro de gravedad del buque vacío para el caso en que no existen cargas líquidas a bordo.
6. Presentar como conclusiones el desplazamiento y el centro de gravedad del buque vacío para el caso de la existencia de cargas líquidas.

Anexo

**Tabla 1.** Curvas hidrostáticas del modelo.

| <b>Calado</b> | <b>Desplazamiento</b> | <b>LCB</b> | <b>VCB</b> | <b>C<sub>b</sub></b> | <b>LCF</b> | <b>KM<sub>T</sub></b> | <b>KM<sub>L</sub></b> |
|---------------|-----------------------|------------|------------|----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>cm</b>     | <b>Kg</b>             | <b>cm</b>  | <b>cm</b>  | <b>[-]</b>           | <b>cm</b>  | <b>cm</b>             | <b>cm</b>             |
| 0.0           | 0.000                 | 0.000      | 0.000      | 0.000                | 0.000      | 0.000                 | 0.000                 |
| 0.5           | 0.001                 | 44.140     | 0.370      | 0.070                | 49.480     | 0.390                 | 1519.700              |
| 1.0           | 0.008                 | 54.190     | 0.760      | 0.080                | 57.370     | 1.070                 | 592.980               |
| 1.5           | 0.028                 | 56.940     | 1.140      | 0.110                | 58.050     | 1.910                 | 301.210               |
| 2.0           | 0.069                 | 57.300     | 1.520      | 0.130                | 56.980     | 2.850                 | 214.480               |
| 2.5           | 0.139                 | 56.680     | 1.900      | 0.160                | 55.220     | 3.860                 | 191.870               |
| 3.0           | 0.245                 | 55.580     | 2.270      | 0.180                | 53.150     | 4.930                 | 191.970               |
| 3.5           | 0.396                 | 54.210     | 2.650      | 0.200                | 50.940     | 6.070                 | 200.360               |
| 4.0           | 0.600                 | 52.690     | 3.030      | 0.220                | 48.650     | 7.260                 | 211.820               |
| 4.5           | 0.867                 | 51.000     | 3.410      | 0.220                | 45.890     | 8.500                 | 236.640               |
| 5.0           | 1.207                 | 49.160     | 3.790      | 0.220                | 43.150     | 9.790                 | 259.400               |
| 5.5           | 1.629                 | 47.270     | 4.170      | 0.230                | 40.810     | 11.130                | 269.830               |
| 6.0           | 2.134                 | 45.540     | 4.550      | 0.240                | 39.240     | 12.520                | 261.800               |
| 6.5           | 2.722                 | 44.050     | 4.920      | 0.260                | 38.110     | 13.980                | 248.340               |
| 7.0           | 3.395                 | 42.780     | 5.280      | 0.270                | 37.240     | 15.490                | 233.730               |
| 7.5           | 4.165                 | 41.700     | 5.650      | 0.260                | 36.770     | 18.950                | 222.080               |
| 8.0           | 5.049                 | 40.740     | 6.010      | 0.290                | 35.330     | 18.900                | 209.110               |
| 8.5           | 5.988                 | 39.920     | 6.370      | 0.320                | 35.640     | 18.850                | 196.140               |
| 9.0           | 6.946                 | 39.340     | 6.690      | 0.350                | 35.860     | 17.910                | 175.730               |
| 9.5           | 7.921                 | 38.920     | 7.010      | 0.370                | 36.030     | 17.240                | 159.420               |
| 10.0          | 8.912                 | 38.610     | 7.310      | 0.390                | 36.140     | 16.780                | 146.000               |
| 10.5          | 9.919                 | 38.360     | 7.610      | 0.410                | 36.250     | 16.470                | 134.990               |
| 11.0          | 10.941                | 38.170     | 7.910      | 0.420                | 36.350     | 16.270                | 125.980               |
| 11.5          | 11.980                | 38.020     | 8.200      | 0.430                | 36.460     | 16.150                | 118.480               |
| 12.0          | 13.035                | 37.900     | 8.480      | 0.450                | 36.550     | 16.100                | 112.130               |
| 12.5          | 14.107                | 37.800     | 8.770      | 0.460                | 36.650     | 16.090                | 106.700               |
| 13.0          | 15.196                | 37.720     | 9.060      | 0.470                | 36.750     | 16.130                | 102.030               |
| 13.5          | 16.302                | 37.660     | 9.340      | 0.470                | 36.860     | 16.200                | 97.980                |
| 14.0          | 17.425                | 37.610     | 9.620      | 0.480                | 36.960     | 16.300                | 94.450                |

**Tabla 2.** Secuencia de movimientos.

| <b>Movimiento</b> | <b>Babor</b> | <b>Etribor</b> |
|-------------------|--------------|----------------|
| <b>Inicial</b>    | 2, 4         | 1,3            |
| <b>1</b>          | 4            | 1, 2, 3        |
| <b>2</b>          | -            | 1, 2, 3, 4     |
| <b>3</b>          | 1            | 2, 3, 4        |
| <b>4</b>          | 1, 3         | 2, 4           |
| <b>5</b>          | 1, 2, 3      | 4              |
| <b>6</b>          | 1, 2, 3, 4   | -              |
| <b>7</b>          | 2, 3, 4      | 1              |
| <b>8</b>          | 2, 4         | 1, 3           |